

四川盆地孝泉—丰谷构造带须家河组气藏 气水分布控制因素及勘探潜力

刘莉萍¹ 林小兵² 李丽平³

1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院 2. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·成都理工大学
3. 中国石油川庆钻探工程公司物探公司研究中心

刘莉萍等. 四川盆地孝泉—丰谷构造带须家河组气藏气水分布控制因素及勘探潜力. 天然气工业, 2013, 33(6): 16-22.

摘要 孝泉—丰谷构造带位于四川盆地川西坳陷中段, 同一构造带内上三叠统须家河组气藏气、水、干层共存, 气水关系异常复杂。为弄清须家河组气藏气水分布的控制因素, 利用气井历年地层水分析资料, 结合生产动态数据研究了该区地层水的特征, 认为钻井生产过程中产出水包含了凝析水以及地层水与凝析水的混合水, 地层水的产出与气藏含气丰度密切相关。在此基础上, 采用洛瓦克相图分析了气水分布的控制因素。结果表明: ①须家河组气藏同一局部构造范围内底水、边水并存, 地层水分布横向连通性差, 平面上分布规模较小, 为各自独立的气水系统; ②古、今构造高部位均有利于水溶气脱溶成藏, 但成藏期古构造起到了决定性作用; ③高地层水矿化度、低地层压力区更有利于游离气气藏的发育。最后, 分析了须二段、须四段的油气勘探潜力, 结论认为: 须二段、须四段游离气、溶解气共存, 须二段水溶气脱溶程度高于须四段, 勘探潜力更大; 合理利用及开采水溶气有利于扩大气藏规模。

关键词 四川盆地 孝泉—丰谷构造带 凝析水 水溶气脱溶 气水分布 控制因素 勘探潜力 晚三叠世

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2013.06.003

Factors controlling gas-water contact and the exploration potential of the Xujiahe Fm gas reservoirs in the Xiaoquan-Fenggu structural zone, Sichuan Basin

Liu Liping¹, Lin Xiaobing², Li Liping³

(1. Exploration and Development Research Institute of Sinopec Southwest Branch Company, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. National Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation // Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Research Center of Geophysical Exploration Company of Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd., CNPC, Chengdu, Sichuan 610213, China)
NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 6, pp.16-22, 6/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The Xiaoquan-Fenggu structural zone is located in the central section of Western Sichuan Depression. Gas, water and dry layers coexist in the Upper Triassic Xujiahe Fm in this structural zone and the gas-water contract is very complex. In order to make clear the factors controlling gas-water contact in the Xujiahe Fm gas reservoirs, the produced water analysis results obtained over the years were integrated with the dynamic production performance data to study the characteristics of formation water. It is believed that the produced water during drilling operation and production is a mixture of condensate water and formation water. The production of condensate water is closely related with gas reservoir abundance. The Nvok phase diagrams were used to analyze the factors controlling gas-water contract. The following conclusions were obtained. (1) Edge water and bottom water coexist in a single local structure in the Xujiahe Fm gas reservoir. The lateral continuity of formation water is poor and its areal distribution is limited. Each local structure has a separate gas-water system. (2) Both the ancient and modern structural highs are favorable for the degassing and accumulation of water-dissolved gas. However, the palaeo-structure of reserv for oiring stage plays a decisive role. (3) Such areas with high formation water salinity and low formation pressure are more favorable the accumulation of free gas. Finally, the exploration potential of the 2nd and 4th members of Xujiahe Fm was analyzed. It is believed that free gas and dissolved gas coexist there, but in the 2nd member of Xujiahe Fm the degassing degree of water soluble gas is relatively higher, and this brings about a higher exploration potential there. Rational utilization and recovery of water dissolved gas is favorable for enlarging the scale of a gas reservoir.

Key words: Xiaoquan-Fenggu structural zone, Sichuan Basin, condensate water, degas of water dissolved gas, gas-water contact, controlling factor, exploration potential, Late Triassic

基金项目: 国家自然科学基金项目“川西地区须家河组砂岩硅质岩屑溶蚀事件及 F 离子在水岩反应中的作用”(编号: 41002032)。

作者简介: 刘莉萍, 女, 1978 年生, 高级工程师, 硕士; 从事油气藏勘探、评价方面的地震、地质综合研究工作。地址: (610041) 四川省成都市高新区(南区) 吉泰路中石化西南科研基地勘探开发院。电话: (028) 65286501。E-mail: lliuliping@163.com

孝泉—丰谷构造带位于川西坳陷中段,为燕山期北东东向大型古隆起,受喜马拉雅构造运动改造在古隆起之上形成孝泉、新场、罗江、合兴场、高庙子、丰谷等多个局部构造^[1-2]。目前上三叠统须家河组勘探的主要目的层为须二段、须四段,辫状河三角洲平原分流河道、前缘水下分流河道、河口坝是主要的储集相带,分流河道的频繁摆动造成巨厚砂体(50~80 m)连片发育^[3],深埋藏强烈压实作用使得砂体总体致密或超致密,特殊物质(火山碎屑、碳酸盐岩屑、长石等)的溶蚀作用^[4-6]致使厚大砂体内部普遍发育5~8 m的相对优质储层。

该区共有须家河组生产井超过40口,几乎所有钻井产气的同时都有地层水产出,只是产水的多少不同。随着勘探开发和研究的深入,更多复杂情况凸现,如孝泉—丰谷古隆起范围内气、水、干层共存,现今构造位置相当或更高、储层物性好的储层反而出水严重(XC6、FG21井),构造位置更低且储层物性稍差的层段却获工业气流(X5、FG22井)。可见,须家河组气水关系及分布控制因素异常复杂。

前人对须家河组地层水特征及其分布规律等做过大量有益的研究,认为川西坳陷须家河组大多数气藏为水溶脱气圈闭,气水分布、富集与调整受古、今构造,尤其是受断裂控制及储层非均质性的影响^[7-9],但研究多以静态的地质特征分析为主。为此,笔者首先通过大量钻井历年地层水分析资料,结合生产动态数据,分析地层水特征;再利用洛瓦克相图分析手段,刻画气水分布特征;进而认识气藏特征,分析气水分布控制因素及勘探潜力,以期为下一步研究及勘探部署指明方向。

1 气水分布特征及控制因素

1.1 地层水特征

1.1.1 动态分析

生产井生产动态及地层水化学分析资料均表明钻井生产过程中产出水不能笼统地理解为须家河组地层水,其中包含了凝析水及地层水与凝析水的混合水,且地层水总矿化度随着天然气产量的上升而降低(表1)。地层水总矿化度的降低应是受气藏凝析水的影响,已有研究通过地层水化学特征、微量元素及氢氧稳定同位素论证了四川盆地须家河组气藏凝析水的存在^[10-11]。

选取该区须家河组气藏典型井进行生产动态与地层水产出特征综合分析(表1)。须二段气藏C1井生产初期气产量大于 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、水产量小于 $5 \text{ m}^3/\text{d}$;C3井生产初期气产量大于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、水产量小于 $1 \text{ m}^3/\text{d}$,此时水分析总矿化度极低,分布在 $0.094 \sim 2.694 \text{ g/L}$,产出水为气藏凝析水;之后气产量降低,水产量增加,产出水从混合水变为地层水。C2井情况相反,2007年气藏未打开之前,气、水产量均不高,产出水矿化度较高,2007年之后储层改造获得成功,获 $5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的天然气产能,产出水总矿化度随着时间的推移不断降低,可见地层水中凝析水的混合逐渐增多。

须四段气藏C4井在气产量大于 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的情况下,仍有 $3 \sim 6 \text{ m}^3/\text{d}$ 水产出,随后在不到1a的时间内气产量迅速下降至 $7 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而水产也同步增至 $40 \sim 50 \text{ m}^3/\text{d}$,可见该井开始生产都有地层水产出,只是含量较低,为混合水,产量下降后产

表1 新场—丰谷构造带须家河组典型井地层水产出特征表

井号	分析时间	地层水离子含量/(g·L ⁻¹)							总矿化度	水性 质	平均日产量	
		主要阳离子				主要阴离子					气/ 10 ⁴ m ³	水/ m ³
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻				
C1	2006年3月	0.002	0.01	0.006	0.03	0.02	0.002	0.2	0.4	凝析	58	4
	2007年1月	1	2.3	1	0.2	43.5	<10	0.2	69.3	混合	48	13
	2009年1月	1.6	36.5	3.6	0.6	63.1	0.01	0.2	105.7	地层	4	111
C2	2005年6月	0.9	34.2	3.8	7.8	75.2	0.06	0.4	122.6	地层	1.1	2.3
	2007年7月	0.6	10.6	1	9.4	35.9	<10	0	58.1	混合	5.2	0.9
	2010年1月	0.06	1.8	46.8	0.3	3.4	0.005	0.4	6.0	凝析	6.1	2.1
C3	1992年1月	0.1	0.1	0	0	0.2	/	0.6	1.2	凝析	10	0.6
	1995年3月	0.8	4	0.2	1.4	41	0	0.5	47.8	混合	3.5	33
	2004年4月	0.8	31.4	0.1	2.6	54.7	<10	0.2	89.8	地层	0.6	1.9
C4	2009年11月	0.3	15.3	2.1	0.2	28.7	0.01	1.1	48.9	混合	30	2.5
	2010年10月	0.3	21.7	2.8	0.5	45.8	<10	0.2	71.3	地层	11	43
C5	2005年10月	0.02	0.6	0.07	0.01	1	0.01	0.2	1.9	凝析	3.9	0.02
	2010年1月	0.4	16.3	2.8	0.3	30.1	0.007	0.4	51.7	混合	0.6	0.8

出水应为须四段地层水。C5井为低产工业气井,仅生产初期产凝析水,其后均产混合水。

可见,生产初期气产量较高时产出总矿化度较低的为凝析水,后期较长一段时间稳定产出且与本段平均矿化度接近的才能视为地层水。地层水的产出与气藏含气丰度密切相关,气产量降低水产量上升,二者为此消彼长的关系,钻井开采过程中应适当控制生产压差,保持稳定的含气丰度。

1.1.2 地层水化学特征

该区须家河组247个地层水样品分析结果表明,阳离子主要有 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,以 Na^+ 为主;阴离子主要有 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- ,以 Cl^- 为主。不同样品离子含量差别很大,即使同一口井不同时期所取样品分析结果也存在较大差异。地层水总矿化度分布范围较大,小于1 g/L与大于100 g/L的样品均存在。通过以上分析,排除凝析水的影响,认为须二段地层水总矿化度分布在78.087~86.35 g/L,平均矿化度为89.25 g/L。须四段地层水含量较多,气水同产情况严重,地层水多为混合水,总矿化度存在较大差异,为47.57~101.3 mg/L,平均为70.866 mg/L。

1.1.3 凝析水——水溶脱气的产物

该区须家河组气藏凝析水的形成与水溶脱气有关。有研究表明凝析水是仅在石油天然气藏内才能出现的特殊状态的地层水,其成因是水蒸气的凝结作用^[10],地层强烈抬升是凝析水形成的必要条件^[11]。由于须家河组地层水相当活跃,且烃源充足,地层保持超压,满足水溶气存在的所有条件^[12-14],并且新场—丰谷构造带受到燕山期、喜马拉雅期多期构造运动抬升、挤压,可以认为水溶气随着地层抬升温度、压力降低从地层水中脱出将水分子带出而形成游离气藏凝析水。

1.2 洛瓦克相图分析

洛瓦克相图常被用于判别不同地层水来源,依靠水化学相图的相似性来寻找地层水及油气的迁移轨迹,并在局部构造乃至四川盆地地层水研究中取得了成功^[15]。笔者尝试应用该方法认识地层水分布及油气运移特征。

1.2.1 地层水分布特征

通过对孝泉—丰谷地区生产井历年地层水洛瓦克相图系统分析,选择相同层位具有代表性且相同或相近时间段的样品分析结果进行对比,表明研究区须家河组同一地区纵向上地层水具相似特征,在同一局部构造范围内底水和边水并存,但地层水分布横向连通性差,不同的构造部位水体不连通,平面上分布规模较小,为独立的气水系统。

1.2.1.1 须二段

孝泉—丰谷地区须二段地层水相图特征大体相似,但不同地区各自略有不同(图1)。合兴场地区CH100、CH127、CH137井历年地层水分析表明,生产后期产出均为须二段的地层水,CH127、CH137井地层水洛瓦克相图也显示出相似的特征,分析为连通的同一水体。新场地区X853、X856、X2井2009年同一批次水样分析矿化度接近,相图特征相似,且3口井距离很近,据此判断X856井区地层水已连通。可见须二段局部裂缝发育地区气藏是连通的。而距X856井区西部6~7 km的X10井,和东部4~5 km的L150井,还有高庙子地区的CG561井相图都不相同,说明不同局部构造水体不连通。这3口井均为工业气井,地层水总矿化度均较低,应受凝析水影响。

1.2.1.2 须四段

须四段的地层水相图(图1)表明地层水分布横向连通性差,下亚段新场、丰谷地区各不相同,但各构造部位纵向上地层水相图有一定的相似性。新场地区XC22井下亚段与X882井上亚段地层水相图特征相似,丰谷地区CF563中亚段与CF175下亚段相图特征相似。X882井区断层发育,而丰谷地区断层不发育,可见须四段气水运移不仅依靠断层、裂缝等快速通道,同时存在垂向运移。

1.2.2 水溶脱气特征

现今的地层水是由最初的沉积水经过深埋藏、参与成岩作用、浓缩变质而成。由于整个须家河组总体属于三角洲沉积,同一时期沉积水化学特征应具有相似性,但是须二、须四段物源、埋深等仍存在差异,又使得各段的地层水有其特殊性。地层水化学相图能揭示这一特征,图1可见须二、须四段地层水洛瓦克相图总体上具相似性,各亚段之间存在差异,而须二上亚段和须四下亚段的相图却相似,认为二者均是受到须三段地层水的影响。

天然气同位素分析,须二段气藏的 $\delta^3 C_1$ 为 $-31.1\% \sim -31.97\%$, $\delta^3 C_2$ 为 $-24.35\% \sim -28.06\%$,均呈现正碳同位素系列。但CH137井 $\delta^3 C_2$ (-24.35%) $>$ $\delta^3 C_3$ (-26.22%),并且 $\delta^3 C_2$ 更接近于须四段天然气特征($-21.53\% \sim -25.33\%$),其来源特征与其余各井存在较大差异。须四段的气源主要来自于下伏须三段烃源岩,CH137井产层位于须二段顶部,可能有须三段烃源向下注入。可见,须二上亚段与须四下亚段均受到须三段烃源的影响,天然气以水溶气的形式,或脱出成游离气,但也难免携带水分子,将须三段地层水的特征带到储集层中。

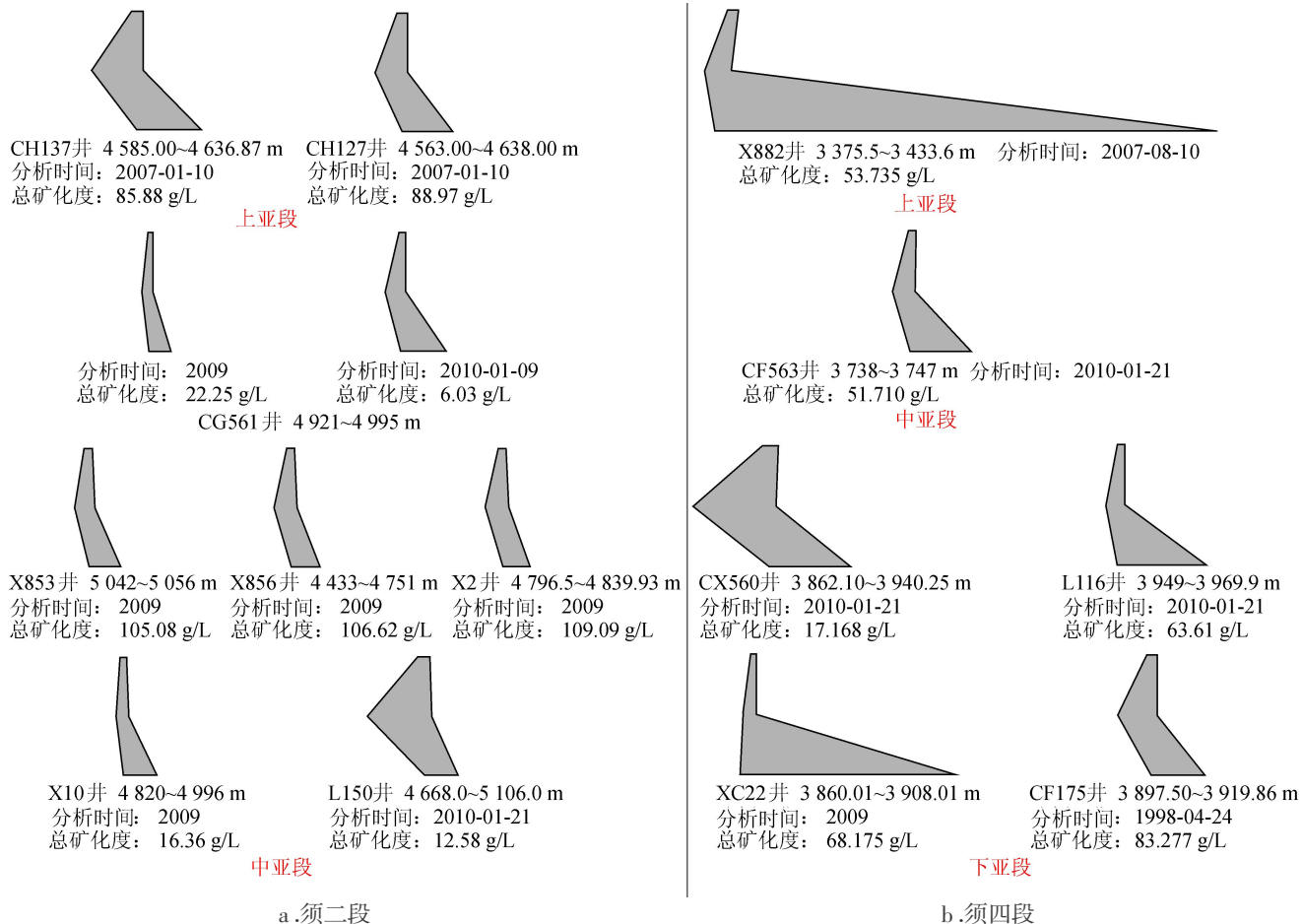


图 1 孝泉—丰谷地区须家河组地层水的水化学相图

1.3 气水分布的控制因素

以上通过对地层水化学特征及洛瓦克相图特征论证了须家河组气藏具水溶脱气特征。因此,控制水溶气脱出程度的因素,也即是气藏气水分布的控制因素。

1.3.1 古、今构造

以须二段气藏为例,成藏关键期较多认识为须家河组沉积末期或中、晚侏罗世等^[16-17],通过对不同时期古构造的恢复,可见千佛崖组沉积末期古构造对早期油气聚集的控制作用与现今勘探实际较为吻合(图2)。成藏期古构造特征为西低东高,东部地区更有利于游离气气藏发育,西部地区地层水、水溶气、游离气共存。

东部高庙子地区 CG561 井从 2007 年至今一直保持 $5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的天然气产能,几乎不产地层水,GM2、GM4 井、丰谷地区 CF563 等井由于测试工艺问题虽未获工业产能,但均不产地层水,而向西的合兴场、新场地区,由于其古构造降低,但现今构造在高部位而有利于水溶气脱出,获得大于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业产能,但受古构造影响早期分配的地层水含量高,钻井无水开采时间较短,分别持续 1~2 a 不产或

产少量地层水,其后高产气井多随着地层水的产出而气产量降低到小于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,有的甚至关井停产。

须二段构造变形程度较须四段强,水溶气脱出程度应高于须四段气藏,与现今生产情况吻合,须四段获得工业气井较少,多为气水同产。

由此可见,多期构造运动作用使得研究区构造形迹复杂,导致水溶气的脱出程度在同一构造带内存在较大差异,形成现今复杂的气水分布局面。古、今构造高部均有利于水溶气脱溶成藏,但成藏期古构造起决定性作用。

1.3.2 地层水矿化度

孝泉—丰谷地区须二段地层水总矿化度大于须四段,从图 3 可见,须二段地层水总矿化度多数大于 75 g/L,而须四段大部分则小于 75 g/L。对于水溶气而言,天然气在地层水中的溶解度随地层水矿化度的增加而降低^[18],因此须二段水溶脱气程度大于须四段,而勘探实践也证明须二段气藏勘探成果较须四段好。

从平面上看,须二段现今气藏气井多位于地层水总矿化度大于 75 g/L 的高矿化度区域,更有利于水溶脱气;须四段现今气藏则正好相反,气井多位于地层水

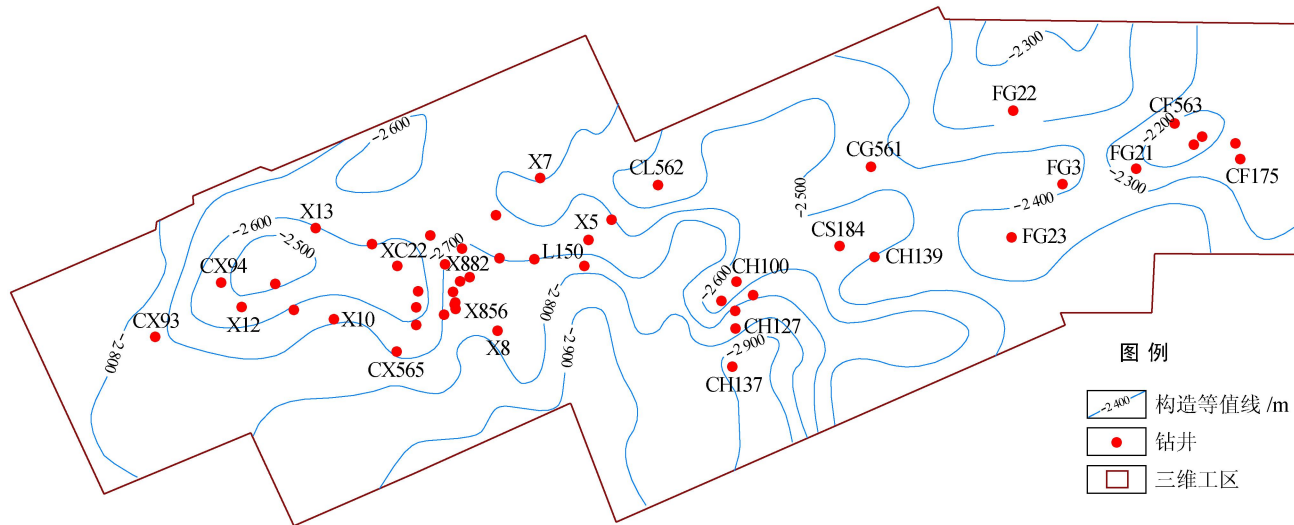
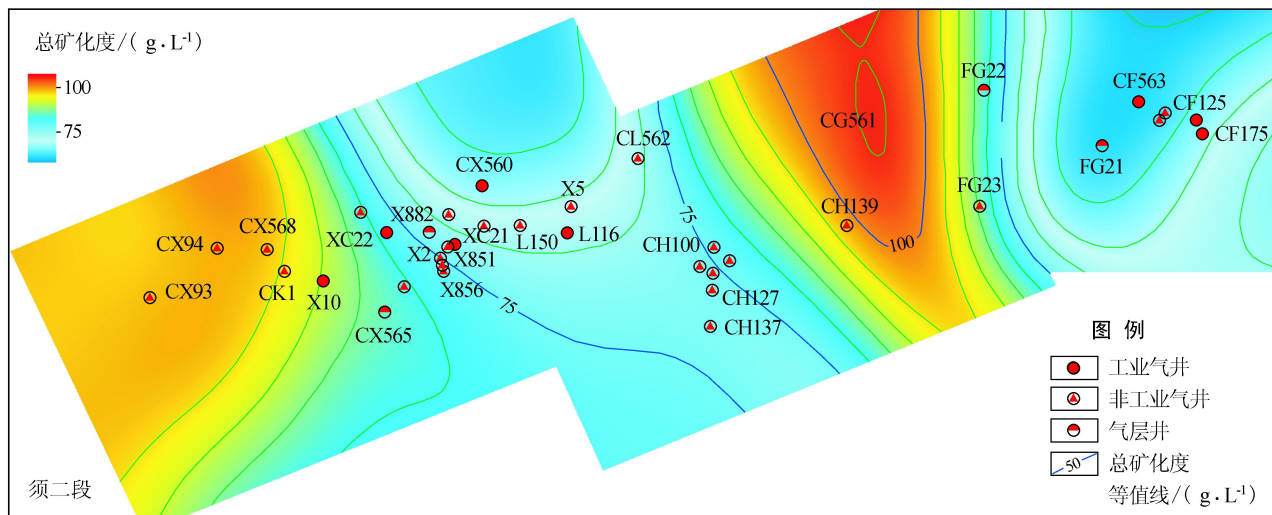
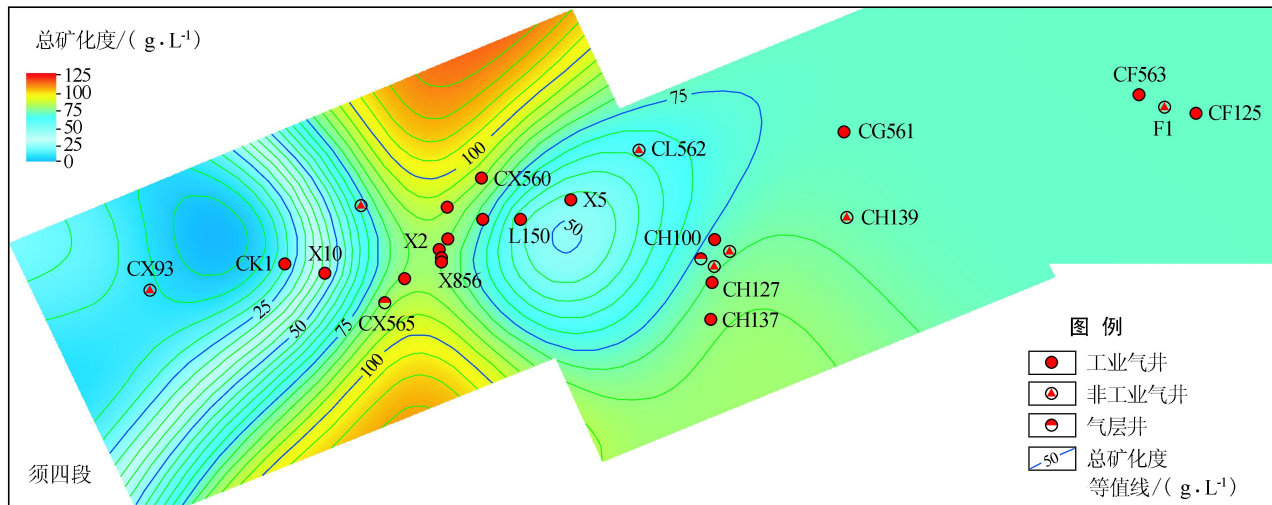


图 2 孝泉—丰谷地区千佛崖组沉积末期须二段顶面埋深图



须二段



须四段

图 3 新场—丰谷构造带须家河组地层水总矿化度平面分布图

总矿化度小于 75 g/L 的地区,才会出现多数钻井产水或气水同产的局面。

因此,地层水矿化度影响、控制了气藏的规模。须二段地层水总矿化度大于须四段,须二、须四段现今气

藏分别对应高、低矿化度区域,须二段水溶气脱出程度较须四段强。

1.3.3 地层压力

须二段地层压力系数变化范围不大,分布在1.57~1.66,须四段大于须二段,且平面上压力变化大,地层压力系数分布在1.47~2.15,均属超压(强超压)气藏。天然气在地层水中的溶解度随地层压力的增加而增大^[18],因此低地层压力区域更有利于水溶气脱出,不产地层水。丰谷地区须四段气藏FG22、CG561井测试获低产气流,不产地层水,2口井均位于相对低地层压力区域,地层压力系数小于1.6;而CF175、FG1井虽获大于 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,但产水 $14 \text{ m}^3/\text{d}$,且产水量上升很快,以至于关井停产,相反的这2口井所处位置地层压力系数大于2.0。

纵向上须二段地层压力小于须四段,更有利于纯气藏发育;平面上,须二段现今气藏对应于相对低地层压力区域,相反须四段现今气藏则对应于相对高地层压力区域,因此须四段气藏勘探效果不理想。

2 勘探潜力分析

2.1 须二段

须二段钻井早期普遍产凝析水,且含凝析水时期越长证明气藏规模越大。游离气与水溶气共生,强烈的构造形变、高地层水矿化度及相对较低且分布稳定的地层压力均有利于水溶脱气形成游离气气藏。

现今地层水中仍含有大量的水溶气,把气藏与其溶有气体的底水或边水当做一个整体看待,当气藏由于开采时期较长,气藏内的压力(即游离气的压力)逐渐降低时,则原来与高压气藏处于平衡状态的水溶气也将随之逐渐从水中析出而进入气藏中,对常规气藏进行补充,有利于延长气藏开采时间。合兴场地区CH137、CH127井开采时间长达20 a,生产复压和排水产气措施对恢复产量效果较好,说明地层水中含有水溶气,随着开采的进行,气藏压力降低,不断有天然气从地层水中脱出,对气源进行补充。

由于水溶气的存在,扩大了天然气成藏的规模或领域,如果合理开采,控制气藏压力缓慢下降,则溶解气将慢慢析出而增加了可采储量,就等于扩大了天然气气藏的规模。

2.2 须四段

须四段气、水共存现象更为严重,气藏含气丰度较低,气水层横向连续性差,地层压力横向变化大,超压、强超压地层均有分布,具水溶气富集的主要条件。新场地区须四上亚段产水明显;丰谷地区须四中亚段钙

屑砂岩储层孔隙性、连通性很好,同样表现出低电阻率,高含水特征;丰谷地区须四下亚段为强超压地层,生产初期高产,但由于开采压差控制不严,边水或底水迅速锥进,大量产地层水。

须四段钻井多数产水,但地层超高压,天然气在水中溶解度大,这可能与地层水矿化度相对较低,且须四段气源主要来自于须三段,也有须四中亚段烃源的贡献,生烃增压强度大有关,因此把气藏与其溶有气体的底水或边水当做一个整体看待,须四段气藏同样具有可观的勘探价值。

3 结论

1)钻井生产过程中产出水包含了凝析水以及地层水与凝析水的混合水。地层水的产出与气藏含气丰度密切相关,气产量降低水产量上升,钻井开采过程中应适当控制生产压差,保持稳定的含气丰度。

2)须家河组同一局部构造范围内底水和边水并存,但不同的构造部位水体不连通。地层水分布横向连通性差,平面上分布规模较小,为独立的气水系统。

3)古、今构造高部位均有利于水溶气脱溶成藏,但成藏期古构造起决定性作用。高地层水矿化度、低地层压力区域更利于游离气气藏发育。

4)须二段水溶气脱溶的程度高于须四段。须二、须四段游离气、溶解气共存,合理利用及开采水溶气有利于扩大气藏规模。

参 考 文 献

- [1] 郭正吾,邓康龄,韩永辉,等.四川盆地形成与演化[M].北京:地质出版社,1996.
GUO Zhengwu, DENG Kangling, HAN Yonghui, et al. The formation and evolution of Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [2] 于福生,王彦华,李晓剑,等.川西坳陷孝泉—丰谷构造带变形特征及成因机制模拟[J].地球科学与环境学报, 2011, 33(1):45-53.
YU Fusheng, WANG Yanhua, LI Xiaojian, et al. Deformation characteristics and genetic simulation of Xiaoquan-Fenggu Structural Belt in west Sichuan Depression[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1):45-53.
- [3] 林小兵,田景春,刘莉萍,等.等时格架及地震反演双重约束的精细砂体对比研究[J].中国矿业大学学报, 2011, 40(3):417-423.
LIN Xiaobing, TIAN Jingchun, LIU Liping, et al. Research on fine sandbody correlation method under the double constraints of isochronous framework and seismic inversion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3):417-423.

- [4] 曾小英,张娟,刘远洋,等.沉积期火山作用对川西拗陷须家河组优质储层的意义[J].石油与天然气地质,2012,33(1):50-60.
ZENG Xiaoying, ZHANG Juan, LIU Yuanyang, et al. Significance of syndepositional volcanism to high quality reservoirs in the Xujiahe Formation, western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1):50-60.
- [5] 曾小英,张小青,钟玉梅.川西拗陷中段须家河组四段钙屑砂岩气层的成因[J].沉积学报,2007,25(6):896-902.
ZENG Xiaoying, ZHANG Xiaoqing, ZHONG Yumei. Origin of calcarenaceous sandstone gas formation of the 4th member of Xujiahe Formation in the middle part of western Sichuan Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6):896-902.
- [6] 孟万斌,吕正祥,冯明石,等.致密砂岩自生伊利石的成因及其对相对优质储层发育的影响——以川西地区须四段储层为例[J].石油学报,2011,32(5):783-790.
MENG Wanbin, LYU Zhengxiang, FENG Mingshi, et al. The origin of authigenic illite in tight sandstones and its effect on the formation of relatively high-quality reservoirs: A case study on sandstones in the 4th member of Xujiahe Formation, western Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5):783-790.
- [7] 黎邦荣,叶军.试论川西拗陷致密砂岩的水溶脱气圈闭——以孝泉—新场—合兴场气田为例[J].四川石油普查,1999(1):57-66.
LI Bangrong, YE Jun. Study on water-soluble gas trap of the tight sandstone gas reservoirs in western Sichuan Depression: In Xiaquan - Xinchang - Hexingchang gas field as an example [J]. Sichuan Petroleum Prospecting, 1999(1):57-66.
- [8] 吴世祥,汪泽成,张林,等.川西地区上三叠统水化学场、水动力场与油气富集关系研究[J].石油实验地质,2002,24(1):61-68.
WU Shixiang, WANG Zecheng, ZHANG Lin, et al. Chemical fields, hydrodynamical fields and gas enrichment in the late Triassic of western Sichuan Basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 2002, 24(1):61-68.
- [9] 黎华继,张晟,安凤山,等.新场气田须二气藏气水分布探讨[J].天然气技术,2008,2(2):28-31.
LI Huaji, ZHANG Sheng, AN Fengshan, et al. Gas and water distribution in Xu'er Reservoir, Xinchang Gasfield [J]. Natural Gas Technology, 2008, 2(2):28-31.
- [10] 赵永胜,周文.川西拗陷须二气藏凝析水地球化学特征及成因初探[J].天然气地球科学,1995,6(1):30-33.
ZHAO Yongsheng, ZHOU Wen. Condensate water chemical character and causes of Xu2 Member Gas Field, western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 1995, 6(1):30-33.
- [11] 李伟,秦胜飞.四川盆地须家河组地层水微量元素与氢氧同位素特征[J].石油学报,2012,33(1):55-63.
LI Wei, QIN Shengfei. Characteristics of trace elements and hydrogen and oxygen isotopes in the formation water of the Xujiahe Formation, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1):55-63.
- [12] 徐思煌.水溶气非常规资源及其脱溶成藏[J].地质科技情报,2010,29(1):43-48.
XU Sihuang. Unconventional dissolved gas resources in water and gas pool formation with degasification [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(1):43-48.
- [13] 李伟,秦胜飞,胡国艺.四川盆地须家河组水溶气的长距离侧向运移与聚集特征[J].天然气工业,2012,32(2):32-37.
LI Wei, QIN Shengfei, HU Guoyi. Long-distance lateral migration and accumulation of water-solved natural gas in the Xujiahe Formation, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2):32-37.
- [14] 张占国,卞从胜.水溶气的类型特征及成藏的主控因素探讨[J].天然气地球科学,2009,19(6):876-881.
ZHANG Zhanguo, BIAN Congsheng. Category features of water-soluble gas and main controlling factors for its accumulation [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 19(6):876-881.
- [15] 赵泽君,张全林,刘岩,等.四川盆地水化学特征标准剖面的建立及其与天然气成藏的关系[J].天然气工业,2012,32(3):49-52.
ZHAO Zejun, ZHANG Quanlin, LIU Yan, et al. Relationship between hydro-chemical characteristics and gas pooling in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3):49-52.
- [16] 刘四兵,沈忠民,吕正祥,等.川西拗陷中段须二段天然气成藏年代探讨[J].成都理工大学学报:自然科学版,2009,36(5):523-530.
LIU Sibing, SHEN Zhongmin, LYU Zhengxiang, et al. Research on the geochronology of forming the gas pools of Member 2 of Xujiahe Formation in the middle West Sichuan Depression, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2009, 36(5):523-530.
- [17] 张世华,李汶国.川西拗陷 T₃x¹⁻² 油气成藏期研究[J].天然气工业,2005,25(12):19-21.
ZHANG Shihua, LI Wenguo. Study on the reservoiring periods of T₃x¹⁻² in west Sichuan Depression [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(12):19-21.
- [18] 刘方槐,颜婉荪.油气田水文地质学原理[M].北京:石油工业出版社,1991.
LIU Fanghuai, YAN Wansun. Principles of hydrogeology of oil & gas fields [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.